ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

БИОЛОГИЯ

BIOLOGY

УДК 599.323.4+577.175.82+612.82+537.531
https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-381-389

Поступило в редакцию 19.04.2024
Received 19.04.2024

Н. В. Чуешова[1], В. М. Щемелев[1], член-корреспондент Ф. И. Висмонт[2], И. А. Чешик[1]

[1]Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
[2]Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ДОФАМИНА, СЕРОТОНИНА, ИХ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ И ПРОИЗВОДНЫХ В ПРЕФРОНТАЛЬНОЙ КОРЕ ГОЛОВНОГО МОЗГА МОЛОДЫХ КРЫС-САМЦОВ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. Исследовано содержание ряда биогенных аминов, их предшественников и производных в префронтальной коре (ПФК) головного мозга крыс-самцов линии Wistar, подвергнутых хроническому воздействию низкоинтенсивного электромагнитного поля устройства Wi-Fi (2,45 ГГц, ППЭ$_{max}$ – 5,83 мкВт/см^2, ППЭ$_{\bar{\chi}}$ – 0,46 ± 0,37 мкВт/см^2, 24 ч/день, 7 дней в неделю) в период их раннего постнатального развития. Установлены изменения содержания дофамина, серотонина, их предшественников и метаболитов в ПФК головного мозга, что определяет развитие нейромедиаторных расстройств в центральной нервной системе, а в последствии – возникновение нарушений поведения, ухудшение социальной адаптации и когнитивных способностей. Выявленные изменения в дофаминергической системе ПФК головного мозга у крыс на ранних стадиях их постнатального развития свидетельствуют о необходимости дальнейшей гигиенической оценки безопасности длительного воздействия электромагнитного излучения на организм, особенно на головной мозг. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят определить нейромедиаторные механизмы, лежащие в основе неблагоприятного воздействия низкоинтенсивных электромагнитных полей на центральную нервную систему, провести оценку их опасности и коррекцию существующих предельно допустимых уровней электромагнитного излучения с учетом реакции нейромедиаторных систем структур головного мозга на данный тип воздействия.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, Wi-Fi, крысы Wistar, головной мозг, префронтальная кора, дофамин, серотонин

Для цитирования. Изменение содержания дофамина, серотонина, их предшественников и производных в префронтальной коре головного мозга молодых крыс-самцов при хроническом воздействии низкоинтенсивного электромагнитного поля / Н. В. Чуешова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 381–389. https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-381-389

Natalya V. Chueshova[1], Vladislav M. Schemelev[1], Corresponding Member Frantishek I. Vismont[2], Ihar A. Cheshik[1]

[1]Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus
[2]Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

CHANGES IN THE CONTENT OF DOPAMINE, SEROTONIN, THEIR PRECURRENTS AND DERIVATIVES IN THE PREFRONTAL CORTEX OF THE BRAIN OF YOUNG MALE RATS UNDER CHRONIC EXPOSURE TO LOW-INTENSE ELECTROMAGNETIC FIELD

Abstract. The content of a number of biogenic amines, their precursors, and derivatives was studied in the prefrontal cortex (PFC) of the brain of male Wistar rats exposed to chronic exposure to a low-intensity electromagnetic field of a Wi-Fi device (24 hours/day, 2.45 GHz, the power flux density did not exceed 583 μW/cm^2, amounting to average – 0.46 ± 0.37 μW/cm^2) during their early postnatal development. Changes in the content of dopamine, serotonin, their precursors, and metabolites in

the PFC of the brain have been established, which determines the development of neurotransmitter disorders in the central nervous system, and subsequently the occurrence of behavioral disorders, the deterioration of social adaptation and cognitive abilities. The identified changes in the dopaminergic system of the PFC of the brain in rats at the early stages of their postnatal development indicate the need for a further hygienic assessment of the safety of long-term exposure to electromagnetic radiation on the body, especially on the brain. Further research in this direction will make it possible to determine neurotransmitter mechanisms underlying the adverse effects of low-intensity electromagnetic fields on the central nervous system, to assess their danger, and to correct the existing maximum permissible levels of electromagnetic radiation, taking into account the reaction of the neurotransmitter systems of brain structures to this type of impact.

Keywords: electromagnetic radiation, Wi-Fi, Wistar rats, brain, prefrontal cortex, dopamine, serotonin

For citation. Chueshova N. V., Schemelev V. M., Vismont F. I., Cheshik I. A. Changes in the content of dopamine, serotonin, their precurrents and derivatives in the prefrontal cortex of the brain of young male rats under chronic exposure to low-intense electromagnetic field. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 381–389 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-381-389

Введение. Проблема безопасности использования беспроводной связи (сотовая связь, интернет) является особо актуальной и приобретает важную медицинскую и социальную значимость. Это обусловлено усложнением электромагнитной обстановки, невосприимчивостью органами чувств человека к электромагнитному излучению (ЭМИ), отсутствием полной ясности о последствиях и механизмах действия электромагнитных полей (ЭМП) различных частот. Все это способствует формированию глобальной экологической проблемы электромагнитного загрязнения окружающей среды и развитию дальнейших исследований влияния ЭМИ на организм человека [1–3].

Рост числа устройств и точек доступа к сети Интернет посредством Wi-Fi привел к постоянному круглосуточному воздействию электромагнитных полей диапазона радиочастот (ЭМП РЧ) на все слои населения, включая детей, беременных женщин и стариков, что, в свою очередь, может являться фактором риска развития множества заболеваний [1].

К одной из наиболее чувствительных, уязвимых систем организма к воздействию ЭМП РЧ относится центральная нервная система (ЦНС) [2–4]. В настоящее время имеет место лавинообразный рост числа научных исследований, посвященных эффектам, последствиям воздействия на организм ЭМП РЧ и, в частности, на метаболизм и транспорт нейромедиаторов [4; 5]. Показано, что микроволновое излучение, воздействуя на организм, может оказывать влияние на функциональное состояние ЦНС и проявляться головной болью, потерей памяти, расстройством режимов сна и бодрствования, повышенной нервозностью, снижением познавательной активности, когнитивными расстройствами [6].

По мнению E. R. Adair наблюдаемые изменения в поведенческих реакциях при воздействии ЭМП зависят от времени экспозиции, величины энергии и могут быть опосредованы вызываемым им нагреванием ткани [7]. Однако было установлено, что микроволновое излучение (2450 МГц, SAR 0,6 Вт/кг) влияет на обучение и память даже при относительно низких значениях плотности потока электромагнитной энергии, которое не вызывает тепловых эффектов в тканях [8]. В то же время в ряде исследований не было обнаружено каких-либо отличий в пространственной ориентации, обучении и памяти животных при воздействии излучения РЧ [9]. Сведения о хроническом влиянии ЭМП Wi-Fi на функциональную активность головного мозга и его моноаминергических систем в настоящее время отсутствуют.

Как известно, моноаминергические системы у позвоночных осуществляют регуляцию нейроэндокринных, репродуктивных, пищеварительных и поведенческих функций [10]. Дофаминергическая система в префронтальной коре (ПФК) играет решающую роль в обеспечении когнитивных функций, включая обучение, память, исполнительные функции и контроль поведения. Показано, что передача информации от одной функциональной группы нейронов ПФК к другой находится под влиянием нейромодулирующего вещества – DA [11].

В связи с этим представлялось интересным изучить влияние ЭМП РЧ на моноаминергические системы ПФК головного мозга – наиболее эволюционно молодой структуры, образующей тесные морфологические связи с другими структурами мозга: гипоталамусом, стриатумом, гиппокампом, корковыми полями лобной доли, поясной извилиной, дорсомедиальными ядрами та-

ламуса и его интраламинарной системой [12]. Были основания полагать, что нарушения в нейромедиаторных процессах в ПФК в раннем возрасте могут привести к ухудшению памяти, депрессиям, психическим и тревожным расстройствам в более позднем возрасте [13].

Цель работы – изучение содержания дофамина, серотонина, их предшественников и производных в префронтальной коре головного мозга у крыс при взрослении в условиях хронического воздействия низкоинтенсивного электромагнитного поля устройства Wi-Fi (2,45 ГГц).

Материалы и методы исследования. Исследования выполнены на 48 белых крысах-самцах линии Вистар возрастом 50–52 суток и массой 160,1 ± 1,4 г на начало эксперимента. Все животные были разделены на две группы: 1. Контроль (n = 24) – животные, не подвергавшиеся воздействию ЭМП; 2. Животные (n = 24), подвергавшиеся воздействию ЭМП устройства Wi-Fi, начиная с возраста 50 дней и до достижения ими 9 месяцев. Выведение из зоны облучения и определение содержания медиаторов моноаминергических (дофамин- и серотонинергических) систем, их предшественников и метаболитов в ПФК проводили при достижении животными возраста 3, 6 и 9 месяцев.

Принимая во внимание известные данные целого ряда научных работ о происходящих в течение суток существенных колебаниях уровня гормонов и биогенных аминов в крови и связанных с ними изменениях энергетического и пластического обменов, испытания в этом исследования проводились в строго определенное время – с 8.00 до 12.00 [14].

Исследования проводились в виварии Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси» после одобрения Этическим комитетом данной организации (протокол заседания № 3 от 24.02.2021). Животные как контрольной, так и экспериментальных групп содержались в соответствии с принципами Надлежащей лабораторной практики (OECD Guide 1:1998, IDT, ГОСТ 33044–2014) в условиях оптимальной внешней температуры (21–23 °С), циклов света/темноты (12/12 ч), бесперебойного электропитания, защиты от инфекций, шума и других факторов окружающей среды. Манипуляции на животных проводились с соблюдением положений «Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» (Directive 2010/63/EU).

Источником ЭМП являлся маршрутизатор Netis WF2780 (Netis SYSTEMS, China). Облучение проводилось на частоте 2,45 ГГц, 7 дней в неделю, 24 ч/день. Роутер размещался в центральной части рабочей зоны (1,2 × 0,8 м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными. Расстояние от источника излучения (роутер) до клетки составляло 20 см. Во время облучения осуществлялся дистанционный контроль наличия электромагнитного поля. Плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ) измерялась прибором ПЗ-41 (СКБ Питон, РФ) в 8 точках на расстоянии 20 см от источника облучения и не превышала 5,83 мкВт/см^2, составляя в среднем – 0,46 ± 0,37 мкВт/см^2.

По окончании электромагнитного воздействия животных контрольной (n = 8) и экспериментальной (n = 8) групп соответствующего возраста наркотизировали (эфирный наркоз), подвергали декапитации, выделяли префронтальную кору больших полушарий головного мозга с немедленной ее глубокой заморозкой в жидком азоте. Затем выделенный биологический материал гомогенизировали в 10-кратном объеме 0,2 М раствора хлорной кислоты, содержащей 40 мг/л $Na_2S_2O_5$, 40 мг/л ЭДТА, 1 мкМ ванилиновой кислоты – внутренний стандарт. Гомогенизацию проводили на холоде с помощью ультразвукового гомогенизатора Biologics Model 3000 (USA). Полученную суспензию центрифугировали в течение 15 мин при +4 °С и 12000 g на рефрижераторной центрифуге Centurion K220R (GB). Полученный супернатант хранили при –80 °С в низкотемпературном морозильнике HFU486 Basic (Heraeus, Германия) для последующей процедуры.

Разделение биогенных аминов и родственных соединений проводили в соответствии с методикой, описанной в [15], с помощью ион-парной высокоэффективной жидкостной хроматографии на оборудовании системы Agilent серии 1100 (США) с детектированием по флуоресценции. Подвижной фазой являлся буферный раствор, содержащий 12 г/л NaH_2PO_4, 0,122 г/л гидрата октансульфоната натрия, 0,04 г/л ЭДТА, 52 мл/л ацетонитрила, 1,6 мл/л CH_3COOH (pH 3,75),

профильтрованный через нейлоновый фильтр с размером пор 0,22 мкм. Условия разделения: колонка Zorbax Eclipse Plus C18 Narrow Bore RR 2,1 × 150 мм; 3,5-Micron (Agilent Technologies, США) термостатировалась при 28 °С. Скорость потока подвижной фазы – 0,2 мл/мин. Детектирование: длина волны возбуждения – 280 нм, излучения – 340 нм.

Смесь стандартов, используемая для калибровки, обрабатывалась как описано выше и включала: тирозин (Tyr), 3,4-диоксифенилаланин (DOPA), дофамин (DA), норадреналин (NE), 3,4-диоксифенилуксусная кислота (DOPAC), триптофан (Trp), 5-окситриптофан (5-HTP), серотонин (5-HT) и 5-оксииндолуксусная кислота (5-HIAA) в концентрациях 1 мкмоль/л. Идентификация определяемых соединений и количественная обработка хроматограмм проводились с использованием метода внутреннего стандарта с помощью программы ChemStation версии B.04.03.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием пакета статистических программ Graph Pad Prism 8.3. Значимость наблюдаемых отличий двух независимых групп по количественному признаку оценивали с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни (*U*-test). Данные представлены как медиана (Me – 50-й процентиль), интерквантильный интервал 25–75 % (LQ; UQ). Различия считали статистически значимыми при вероятности ошибки менее 5 % ($p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение. Исследовано содержание ряда биогенных аминов, их предшественников и производных в ПФК головного мозга крыс-самцов, подвергнутых хроническому воздействию низкоинтенсивного электромагнитного поля устройства Wi-Fi на протяжении раннего постнатального развития.

Выявлено, что хроническое воздействие ЭМП Wi-Fi на организм в период его раннего постнатального развития – 3 месяца, приводит к изменениям содержания дофамина, его предшественников и метаболита норэпинефрина в ПФК, а именно к тенденции (менее 4 % по сравнению с контрольным уровнем) в снижении Tyr, NE и DA при увеличении уровня DOPA (табл. 1).

Таблица 1. **Содержание дофамина, его предшественников и метаболита норэпинефрина в префронтальной коре головного мозга крыс-самцов в возрасте 3, 6 и 9 месяцев, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП**

Table 1. **Content of dopamine, its precursors and norepinephrine metabolite in the prefrontal cortex of male rats aged 3, 6 and 9 months exposed to chronic exposure to EMF**

Экспериментальные группы Experimental groups	Исследуемый показатель The indicator under study			
	Tyr, нмоль/г	DOPA, нмоль/г	DA, нмоль/г	NE, нмоль/г
3 месяца				
Контроль	86,15 (81,03; 98,51)	0,34 (0,24 0,43)	1,92 (1,78; 3,70)	3,29 (3,07; 3,60)
Wi-Fi	84,18 (81,95; 93,79)	0,37 (0,31; 0,43)	1,73 (1,48; 2,48)	3,25 (2,98; 3,31)
p	0,04	0,01	0,54	0,02
6 месяцев				
Контроль	95,68 (79,98; 96,36)	0,23 (0,22; 0,36)	1,23 (1,03;1,49)	4,17 (3,63; 4,26)
Wi-Fi	77,48 (69,50; 84,09)	0,45 (0,39; 0,56)	4,60 (3,30; 4,98)	3,62 (3,34; 3,91)
p	0,05	0,03	0,02	0,13
9 месяцев				
Контроль	86,90 (83,70; 102,4)	0,10 (0,08; 0,13)	0,95 (0,65; 1,25)	3,89 (3,13; 4,04)
Wi-Fi	75,71 (64,76; 83,58)	0,09 (0,07; 0,1)	1,15 (0,91; 1,25)	3,64 (3,28; 3,91)
p	0,03	0,47	0,54	0,68

Примечания: *p* – уровень значимости различий к группе необлученных животных (тест Манна–Уитни); Tyr – тирозин; DOPA – диоксифенилаланин; DA – дофамин; NE – норэпинефрин.

Notes: *p* – level of significance of differences in the group of non-irradiated animals (Mann–Whitney test); Tyr – tyrosine; DOPA – dioxyphenylalanine; DA – dopamine; NE – norepinephrine.

Установлено, что выявленная слабая реакция дофаминергической системы на хроническое электромагнитное воздействие у молодого организма (3 месяца) сменяется выраженными изменениями содержания нейромедиаторов дофаминергических структур в ПФК головного мозга у животных, подвергнутых более длительной экспозиции – 6 месяцев, что проявилось статистически значимым снижением уровня Tyr (на 19,1 % при $p = 0,05$) и увеличением концентрации его метаболитов – DOPA и DA, практически в 2 ($p = 0,03$) и 4 раза соответственно при сравнении с контрольным значением. Обнаруженное снижение концентрации Tyr сохраняется и у животных в возрасте 9 месяцев, что соответствовало 87,1 % ($p = 0,03$) по отношению к контролю при нормализации уровня DA и DOPA.

Выраженное снижение уровня Tyr у животных, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП, вероятно, обусловлено его вовлечением в образование DOPA, увеличение содержания которого указывает на нарастание синтеза DA [16]. По мнению ряда авторов, воздействие хронического стресса на организм, особенно в раннем возрасте, может привести к префронтальной дисфункции и структурно-функциональным изменениям, в том числе изменению возбудимости рецепторов нейронов в ПФК, что, в свою очередь, приводит к когнитивной дисфункции, связанной с нарушением рабочей памяти, поведенческой гибкостью и планированием на будущее [17]. Общеизвестно, что внимание, рабочая память и принятие решений приписывается ПФК. Выполнение данных функций ПФК невозможно без участия нейромедиаторов, в частности, DA, которому в этих процессах отводится важнейшая роль [18].

До сих пор существует гипотеза, что дисфункция дофаминергических систем в ПФК (особенно в дорсолатеральной префронтальной коре) приводит к социальным и когнитивным дефицитам. Показано, что подавление префронтальных дофаминергических систем ухудшает социальные взаимодействия, что свидетельствует об участии DA структур префронтальной коры в регуляции социального поведения. А, как известно, социальный стресс, который также может вызвать социальную изоляцию, способствует выбросу DA в префронтальную кору. Усиленное высвобождение DA в медиальной ПФК отмечено в эксперименте у животных на модели с низким уровнем социального взаимодействия, включая модели психосоциального стресса и модели животных с эндофенотипами шизофрении [19].

Можно предположить, что установленное нами в эксперименте значительное повышение содержания DA в ПФК (6 месяцев) будет сказываться на процессах познания, мотивации, повышенного настроения, эффекте вознаграждения, а также способствовать повышенной уязвимости к стрессу, агрессивному поведению и формированию зависимостей (например, злоупотреблению наркотиками) и ассоциировано с развитием в последующем ряда психических заболеваний [14; 15].

Общеизвестно, что ПФК тесно взаимосвязана с многочисленными корковыми и подкорковыми структурами, такими как таламус и ствол мозга. Важно отметить, что она получает чрезвычайно плотные входные сигналы от нейромодуляторных центров ствола и переднего мозга, включая серотонинергические ядра шва. Серотонинсодержащие (5-гидрокситриптамин, 5-НТ) нейроны в дорсальном и срединном ядрах шва посылают аксоны в несколько субрегионов ПФК грызунов: поясную, прелимбическую и инфралимбическую кору. Прочные анатомические и функциональные взаимосвязи между ПФК и ядрами шва также позволяют предположить, что 5-НТ играет важную роль в регуляции исполнительной функции. Показано, что содержание 5-НТ в структурах ПФК имеет значимость в процессах формирования кратковременной памяти, внимания и когнитивной гибкости. Кроме того, уровни 5-НТ имеют решающее значение для поведенческого торможения, поскольку повышение или снижение уровня 5-НТ в ПФК сопровождается увеличением импульсивности [20].

При анализе данных содержания 5-НТ, его предшественников и метаболита – 5-гидроксииндолуксусной кислоты в ПФК у животных в возрасте 3 месяцев в условиях хронической экспозиции ЭМП Wi-Fi выявлено увеличение уровня Trp на 12,0 % ($p = 0,04$) и его метаболита 5-НТ (на 6,0 %, при $p = 0,04$) – основного нейромедиатора серотонинергической системы в ПФК (табл. 2). Напротив, у животных экспериментальной группы в возрасте 6 и 9 месяцев имела

Т а б л и ц а 2. **Содержание серотонина, его предшественников и метаболита 5-гидроксииндолуксусной кислоты в префронтальной коре головного мозга крыс-самцов в возрасте 3, 6 и 9 месяцев, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП**

T a b l e 2. **The content of serotonin, its precursors and the metabolite 5-hydroxyindoleacetic acid in the of the prefrontal cortex of male rats aged 3, 6 and 9 months, subjected to chronic exposure to EMF**

Экспериментальные группы Experimental groups	Исследуемый показатель The indicator under study			
	Trp, нмоль/г	5-HTP, нмоль/г	5-HT, нмоль/г	5-HIAA, нмоль/г
3 месяца				
Контроль	23,52 (21,88; 24,61)	0,21 (0,2; 0,24)	11,77 (11,33; 14,77)	3,99 (3,72; 4,79)
Wi-Fi	26,35 (24,83; 27,26)	0,18 (0,18; 0,22)	12,48 (11,55; 14,13)	4,30 (3,87; 5,13)
p	0,04	0,34	0,04	0,40
6 месяцев				
Контроль	24,93 (24,18; 26,16)	0,25 (0,22; 0,30)	6,77 (6,12; 8,57)	2,66 (2,35; 2,88)
Wi-Fi	23,16 (21,02; 24,11)	0,24 (0,22; 0,25)	7,87 (6,53; 8,14)	2,73 (2,33; 3,31)
p	0,05	0,54	0,93	0,66
9 месяцев				
Контроль	25,00 (23,03; 28,57)	0,21 (0,19; 0,28)	15,55 (13,23; 18,15)	4,98 (4,59; 5,61)
Wi-Fi	22,55 (20,62; 25,13)	0,19 (0,16; 0,21)	14,87 (12,85; 15,30)	4,10 (3,86; 4,73)
p	0,09	0,31	0,39	0,06

П р и м е ч а н и я: *p* – уровень значимости различий к группе необлученных животных (тест Манна–Уитни); Trp – триптофан; 5-HTP – 5-гидрокситриптофан; 5-HT – 5-гидрокситриптамин или серотонин; 5-HIAA – 5-гидроксииндолуксусная кислота.

N o t e s: *p* – level of significance of differences in the group of non-irradiated animals (Mann–Whitney test); Trp – tryptophan; 5-HTP – 5-hydroxytryptophan; 5-HT – 5-hydroxytryptamine or serotonin; 5-HIAA – 5-hydroxyindoleacetic acid.

место тенденция снижения содержания Trp при относительно нормальном содержании его метаболитов – 5-HTP, 5-HT и 5-HIAA.

Отсутствие значительных изменений в содержании 5-HT и его метаболита в структурах ПФК головного мозга крыс-самцов на стадии раннего постнатального развития в условиях хронического влияния ЭМП устройства Wi-Fi позволяет предположить меньшую восприимчивость серотонинергической системы ПФК молодого организма к воздействию ЭМИ устройств подвижной сотовой связи. В сравнении с дофаминергическими системами ПФК, в которых выявлена ранняя тенденция к изменению содержания DA и повышенному его накоплению при взрослении, серотонинергическая система демонстрирует некоторые незначительные изменения в раннем возрасте, но относительно стабильный уровень 5-HT в зрелом возрасте в условиях хронического воздействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения.

Выявление критических структур организма к воздействию антропогенных факторов, в том числе электромагнитных полей, является одной из важнейших задач в области гигиенического нормирования уровня электромагнитных излучений. В связи с чем выявленные изменения в функционировании дофаминергической системы префронтальной коры головного мозга позволят адекватно оценить действующие нормативы для ЭМИ устройств подвижной сотовой связи по предельным уровням, воздействующим на человека, что позволит минимизировать вклад данного типа воздействия в развитие заболеваний ЦНС, связанных с нарушением баланса моноаминов. Выявление механизмов, лежащих в основе пагубного влияния ЭМП дециметрового диапазона на живые системы, позволит более скрупулезно подойти к разработке рекомендаций по безопасному обращению с источниками ЭМИ в быту.

Полученные данные послужат научным обоснованием разработки гигиенических норм и адекватной оценки опасности ЭМИ диапазона радиочастот при их воздействии на человека с точки зрения биологической обоснованности. Исследования в данном направлении имеют важное, фундаментальное и прикладное значение и вносят существенный вклад в понимание механизмов негативного воздействия ЭМИ на живой организм, необходимости ограничений широкого использования беспроводных технологий информационного обслуживания населения с целью обеспечения их безопасности.

Заключение. Выявленные особенности изменения содержания дофамина, серотонина, их предшественников и производных в ПФК головного мозга у крыс при их взрослении в условиях хронического воздействия ЭМП устройства Wi-Fi (2,45 ГГц, $ППЭ_{max}$ – 5,83 мкВт/см^2, $ППЭ_{\bar{\chi}}$ – 0,46 ± 0,37 мкВт/см^2, 24 ч/день, 7 дней в неделю) указывают на более значимую реакцию, по сравнению с серотонинергической, дофаминергической системы ПФК головного мозга. Повышение уровня дофамина в ПФК в молодом возрасте в этих условиях может стать определяющим фактором возникновения ее дисфункции при взрослении, что может проявляться нарушениями поведения, ухудшением социальной адаптации и когнитивных способностей. К тому же выявленные особенности реакции дофаминергической системы ПФК развивающегося организма к ЭМИ устройств подвижной сотовой связи требует разработки новых подходов и уточнения гигиенических мер по минимизации длительного воздействия ЭМИ на организм, особенно на головной мозг.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список использованных источников

1. Григорьев, Ю. Г. Значимость адекватной информации по оценке опасности ЭМП сотовой связи для здоровья населения (первая четверть XXI века) / Ю. Г. Григорьев // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т. 60, № 5. – С. 532–540. https://doi.org/10.31857/s0869803120050045

2. Pall, M. L. Wi-Fi is an important threat to human health / M. L. Pall // Environmental Research. – 2018. – Vol. 164. – P. 405–416. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.035

3. Kesari, K. K. Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain / K. K. Kesari, J. Behari, S. Kumar // Int. J. Radiat Biol. – 2010. – Vol. 86, N 4. – P. 334–343. https://doi.org/10.3109/09553000903564059

4. Hu, C. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation on neurotransmitters in the brain / C. Hu, H. Zuo, Y. Li // Front. Public Health. – 2021. – Vol. 9. – Art. 691880. https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.691880

5. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system / Ju Hwan Kim [et al.] // Biomol. Ther. – 2019. – Vol. 27, N 3. – P. 265–275. https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152

6. Hossmann, K. A. Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system / K. A. Hossmann, D. M. Hermann // Bioelectromagnetics. – 2003. – Vol. 24, N 1. – P. 49–62. https://doi.org/10.1002/bem.10068

7. Adair, E. R. Thermoregulatory responses to RF energy absorption / E. R. Adair, D. R. Black // Bioelectromagnetics. – 2003. – Vol. 24, N S6. – P. S17–S38. https://doi.org/10.1002/bem.10133

8. Lai, H. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat / H. Lai, A. Horita, A. W. Guy // Bioelectromagnetics. – 1994. – Vol. 15, N 2. – P. 95–104. https://doi.org/10.1002/bem.2250150202

9. Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations / M. Röösli [et al.] // Bull. World Health Organization. – 2010. – Vol. 88. – P. 887–896. https://doi.org/10.2471/blt.09.071852

10. Ashby, F. G. Differential effects of dopamine-directed treatments on cognition / F. G. Ashby, V. Valentin, S. von Meer // Neuropsychiatric Disease and Treatment. – 2015. – Vol. 2015, N 11. – P. 1859–1875. https://doi.org/10.2147/ndt.s65875

11. Ott, T. Dopamine and cognitive control in prefrontal cortex / T. Ott, A. Nieder // Trends in Cognitive Sciences. – 2019. – Vol. 23, N 3. – P. 213–234. https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.12.006

12. Крачун, Г. П. К проблеме организации психофизиологических механизмов деятельности эволюционно новых интегральных информационно-сетевых систем мозга: функциональная система префронтальной ассоциативной коры и ее роль в процессах социальной адаптации человека / Г. П. Крачун, Ю. И. Щерба // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 514.

13. Structural variations in prefrontal cortex mediate the relationship between early childhood stress and spatial working memory / J. L. Hanson [et al.] // J. Neurosci. – 2012. – Vol. 32, N 23. – P. 7917–7925. https://doi.org/10.1523/jneurosci.0307-12.2012

14. Jouvet, M. The role of monoamines and acetylcholine-containing neurons in the regulation of the sleep-waking cycle / M. Jouvet // Neurophysiology and Neurochemistry of Sleep and Wakefulness. – Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 166–307. https://doi.org/10.1007/3-540-05462-6_2

15. Дорошенко, Е. М. Биогенные моноамины, их предшественники и метаболиты в мозге крыс при экспериментальной недостаточности кровообращения / Е. М. Дорошенко, В. В. Лелевич // Нейрохимия. – 2020. – Т. 37, № 3. – С. 240–248. https://doi.org/10.31857/s1027813320030036

16. Meiser, J. Complexity of dopamine metabolism / J. Meiser, D. Weindl, K. Hiller // Cell Communication and Signaling. – 2013. – Vol. 11. – Art. 34. https://doi.org/10.1186/1478-811x-11-34

17. Goto, Y. Functional and dysfunctional synaptic plasticity in prefrontal cortex: roles in psychiatric disorders / Y. Goto, C. R. Yang, S. Otani // Biological Psychiatry. – 2010. – Vol. 67, N 3. – P. 199–207. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.08.026

18. Carlén, M. What constitutes the prefrontal cortex? / M. Carlén // Science. – 2017. – Vol. 358, N 6362. – P. 478–482. https://doi.org/10.1126/science.aan8868

19. The dual role of dopamine in the modulation of information processing in the prefrontal cortex underlying social behavior / H. Sotoyama [et al.] // FASEB Journal. – 2022. – Vol. 36. – Art. 22160. https://doi.org/10.1096/fj.202101637r

20. Puig, M. V. Serotonin and prefrontal cortex function: neurons, networks, and circuits / M. V. Puig, A. T. Gulledge // Molecular Neurobiology. – 2011. – Vol. 44. – P. 449–464. https://doi.org/10.1007/s12035-011-8214-0

References

1. Grigoriev Yu. G. Significance of adequate information about the danger of cellular connection for health of population in the XXI century. *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*, 2020, vol. 60, no. 5, pp. 532–540 (in Russian). https://doi.org/10.31857/s0869803120050045

2. Pall M. L. Wi-Fi is an important threat to human health. *Environmental Research*, 2018, vol. 164, pp. 405–416. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.035

3. Kesari K. K., Behari J., Kumar S. Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain. *International Journal of Radiation Biology*, 2010, vol. 86, no. 4, pp. 334–343. https://doi.org/10.3109/09553000903564059

4. Hu C., Zuo H., Li Y. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation on neurotransmitters in the brain. *Frontiers in Public Health*, 2021, vol. 9, art. 691880. https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.691880

5. Kim J. H., Lee J. K., Kim H. G., Kim K. B., Kim H. R. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system. *Biomolecules and Therapeutics*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 265–275. https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152

6. Hossmann K. A., Hermann D. M. Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. *Bioelectromagnetics*, 2003, vol. 24, no. 1, pp. 49–62. https://doi.org/10.1002/bem.10068

7. Adair E. R., Black D. R. Thermoregulatory responses to RF energy absorption. *Bioelectromagnetics*, 2003, vol. 24, no. S6, pp. S17–S38. https://doi.org/10.1002/bem.10133

8. Lai H., Horita A., Guy A. W. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics*, 1994, vol. 15, no. 2, pp. 95–104. https://doi.org/10.1002/bem.2250150202

9. Röösli M., Frei P., Mohlera E., Hug K. Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Bulletin of the World Health Organization*, 2010, vol. 88, pp. 887–896. https://doi.org/10.2471/blt.09.071852

10. Ashby F. G., Valentin V., von Meer S. Differential effects of dopamine-directed treatments on cognition. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 2015, vol. 2015, no. 11, pp. 1859–1875. https://doi.org/10.2147/ndt.s65875

11. Ott T., Nieder A. Dopamine and cognitive control in prefrontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 213–234. https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.12.006

12. Krachun G. P., Scherba Yu. I. To the problem of psycho-physiological mechanisms of the evolutionary new integrated information network systems of the brain: a functional system prefrontal association cortex and it's role in processes of social adaptation of the person. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 5, pp. 514 (in Russian).

13. Hanson J. L., Chung M. K., Avants B. B., Rudolph K. D., Shirtcliff E. A., Gee J. C., Davidson R. J., Pollak S. D. Structural variations in prefrontal cortex mediate the relationship between early childhood stress and spatial working memory. *Journal of Neuroscience*, 2012, vol. 32, no. 23, pp. 7917–7925. https://doi.org/10.1523/jneurosci.0307-12.2012

14. Jouvet M. The role of monoamines and acetylcholine-containing neurons in the regulation of the sleep-waking cycle. *Neurophysiology and Neurochemistry of Sleep and Wakefulness*. Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 166–307. https://doi.org/10.1007/3-540-05462-6_2

15. Doroshenko E. M., Lelevich V. V. Biogenic monoamines, their precursors, and metabolites in the brain of rats with experimental circulatory failure. *Nejrohimiya = Neurochemistry*, 2020, vol. 37, no. 3, pp. 240–248 (in Russian). https://doi.org/10.31857/s1027813320030036

16. Meiser J., Weindl D., Hiller K. Complexity of dopamine metabolism. *Cell Communication and Signaling*, 2013, vol. 11, art. 34. https://doi.org/10.1186/1478-811x-11-34

17. Goto Y., Yang C. R., Otani S. Functional and dysfunctional synaptic plasticity in prefrontal cortex: roles in psychiatric disorders. *Biological Psychiatry*, 2010, vol. 67, no. 3, pp. 199–207. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.08.026

18. Carlén M. What constitutes the prefrontal cortex? *Science*, 2017, vol. 358, no. 6362, pp. 478–482. https://doi.org/10.1126/science.aan8868

19. Sotoyama H., Inaba H., Iwakura Y., Namba H., Takei N., Sasaoka T., Nawa H. The dual role of dopamine in the modulation of information processing in the prefrontal cortex underlying social behavior. *FASEB Journal*, 2022, vol. 36, art. 22160. https://doi.org/10.1096/fj.202101637r

20. Puig M. V., Gulledge A. T. Serotonin and prefrontal cortex function: neurons, networks, and circuits. *Molecular Neurobiology*, 2011, vol. 44, pp. 449–464. https://doi.org/10.1007/s12035-011-8214-0

Информация об авторах

Чуешова Наталья Владимировна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: natalya-chueshova@tut.by. ORCID: 0000-0002-4854-1717.

Щемелев Владислав Михайлович – мл. науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: shemelev_vlad@mail.ru. ORCID: 0000-0002-5552-0965.

Висмонт Франтишек Иванович – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр-т Дзержинского, 83, 220083, Минск, Республика Беларусь). E-mail: patfiz@bsmu.by.

Чешик Игорь Анатольевич – канд. мед. наук, доцент, директор. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: irb@irb.basnet.by. ORCID: 0000-0003-4436-9371.

Information about the authors

Chueshova Natalya V. – Ph. D. (Biology), Head of the Laboratory. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E mail: natalya-chueshova@tut.by. ORCID: 0000-0002-4854-1717.

Schemelev Vladislav M. – Junior Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E mail: shemelev_vlad@mail.ru. ORCID: 0000-0002-5552-0965.

Vismont Frantishek I. – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinski Ave., 220083, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patfiz@bsmu.by. ORCID: 0000-0002-4613-6494.

Cheshyk Ihar A. – Ph. D. (Medicine), Associate Professor, Director. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: irb@irb.basnet.by. ORCID: 0000-0003-4436-9371.